

山地溪流での河床変動を扱う際の実用モデルと試行例(2)ー浮遊砂の取り扱いー

日本工営(株) ○伊藤隆郭, 長山孝彦, 渡部春樹, 水野裕斗, 京都大学名誉教授 藤田正治

1. はじめに: 筆者らは山地溪流における実用的な 1 次元河床変動モデルを開発・適用してきており、モデルでは、勾配の小さい扇状地域へ流砂が連続して受け渡されるような工夫も行っている²⁾。計算結果と流砂観測データの比較のため、実出水で観測された観測枡や濁度計の計測値と比較した³⁾。その結果、掃流砂量は比較的良い一致を見たが、細粒成分は、ある粒径階での土砂濃度の再現がよいものの、土砂量全体の予測には過大な予測結果が得られ³⁾、特に、浮遊砂の基準面濃度の改良が必要となった。ここでは、前報²⁾に引き、浮遊砂の取り扱いのうち、基準面濃度に関する改良を行った。なお、浮遊砂の時空間の追跡には、乱流構造の扱いには改良を加えず、巻き上がり・沈降と拡散型モデルによる枠組みを用いる。

2. 実用的な 1 次元河床変動モデル: 崩壊・土石流と云った間欠的に発生する一次的な生産土砂 (1 次生産) は、土石流等の形態で流下し河床勾配が 3~5° の領域で堆積することは経験的に知られている。さらに、一次生産土砂は流水の作用を受け、掃流・浮遊・ウォッシュロードの形態で流水と連続的に流下することも知られている (2 次生産)。1 次生産の土砂移動形態のうち、水面付近に清水層が形成される土砂流は、流水流の影響が強く、河床勾配が 12° 程度以下の領域で形成される。したがって、河床勾配が 10° 以下の領域では、流水の作用によって、土砂流~掃流・浮遊の土砂移動形態となり、掃流砂量式や浮遊砂の巻き上がり・沈降モデルによる計算が出来るようになる²⁾。この場合、従前のよく知られた河床変動に関する式系を用いることになるため、河床侵食・堆積に対して侵食速度等の湧きだし・吸い込み項を用いずに、式系の定数同定を行う必要がない。

1)浮遊砂の扱い: 既往検討³⁾では、基準面濃度には芦田・道上式⁴⁾や Garcia-Parker 式⁵⁾を適用したが、既往

の実験データに対して外挿線を引くことにした²⁾。図-1 は、外挿線を下式のように定式化して示したものである。外挿式は芦田・道上式に類似した値をとるが、沈降速度と摩擦速度の比が 1 である浮遊限界よりも沈降速度が大きい場合には、基準面濃度がゼロに漸近するようにした。現状では、基準面濃度を頭打ちとする α に対する検討が残されている。前報²⁾では、 $\alpha = 1.0$ としたが、ここでは、 $\alpha = 1.0, 1.0$ よりも小さい値の代表として 1/3 を用いて比較する。

$$w_k/u_* \geq 0.01 : C_{ek} = 0.0152 \left(\frac{1}{w_k/u_*} - 1 \right)^{0.8} \quad (1)$$

$$w_k/u_* < 0.01 : C_{ek} = \alpha C_* \quad (2)$$

静止堆積濃度 $C_* = 0.6$ とした場合、 $\alpha = 1.0$ のときは基準面濃度が 0.6、 $\alpha = 1/3$ のときは基準面濃度が 0.2 となる。図-2 は式(2)において、 $\alpha = 1.0, \alpha = 1/3$ のときの式(1)と式(2)を線描したものである。図中の(A)→(B)→(C)が $\alpha = 1.0$ 、(A)→(D)が $\alpha = 1/3$ の時である。移動床の掃流砂流や土砂流での流砂移動層の土砂濃度分布を想定した場合、層内の平均濃度は、凡そ、 $C_*/2$ となる⁶⁾。流砂移動層の上方に浮遊砂層があると想定し、流砂移動層内の土砂濃度が平均濃度とすると、 $\alpha = 1/3$ での基準面濃度 (0.2) は、流砂移動層の上面での土砂濃度 (0.3) よりも多少小さい値の設定になる。

図-3 は土石流から掃流砂流のアナロジーで細粒土砂の流れを類推した流れのモデルのイメージ⁷⁾である。図の右側が泥流から浮遊砂流における遷移モデルである。移動床河床底面付近に掃流等の流砂移動層が形成されるとすれば、浮遊砂流はその上方に乗り乱流拡散が卓越する流れとして扱うことが出来るとした考え方である。図

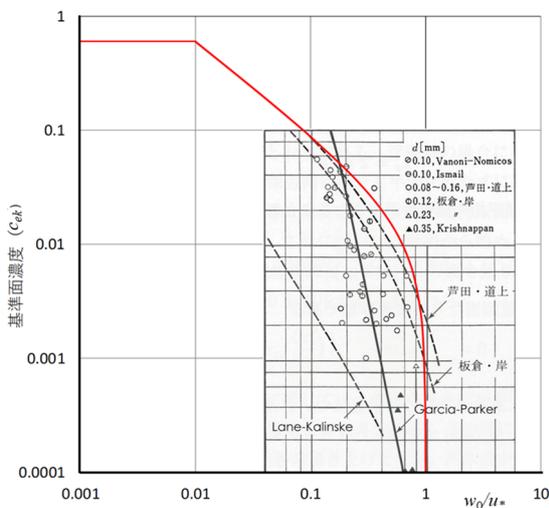


図-1 基準面濃度の外挿線と既往成果との比較²⁾

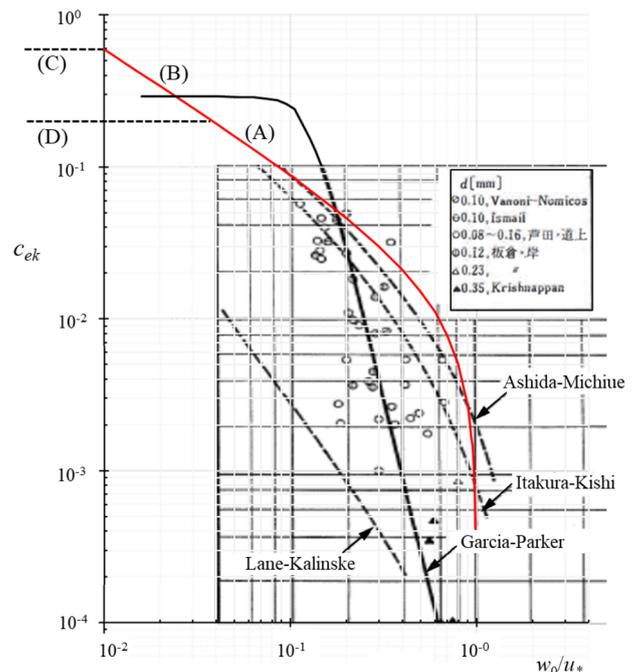


図-2 基準面濃度の上限値の設定

図-3を参考にすると、図-2の浮遊砂流の基準面濃度を扱う際には、基準面濃度は少なくとも静止体積濃度 C_* よりも小さく扱う必要があると共に、その値は静止体積濃度 C_* よりかなり小さく設定する必要があるように思われる。従って、式(2)に示す $\alpha=1.0$ の設定は、基準面濃度の頭打ちの値としては過大なものである可能性が高いことを示している。

さらに、基準面濃度は、流砂移動層の平均濃度($C_*/2$)と比べて同程度の値である可能性も示している。ここでの式(2)の α に対する検討は、このような流れのモデルから見た上では現象論的な根拠をもっている。一方、図-3に示すアナロジーは、流砂移動層と乱流拡散層との境界での圧力等の連続関係など解明される必要が残されているものの、図-3に示す考え方は今後の浮遊砂流の扱いを考えていく上で参考になる情報である。

図-2に示すように、基準面濃度について、基準面濃度の外挿式の頭打ち条件 ($\alpha=1.0$, $\alpha=1/3$) の違いと Garsia-Parker 式の違いを比較する。

2)基準面濃度の違い: 図-2より、Garsia-Parker 式をみると、沈降速度と摩擦速度の比 (w_0/u_*) が 0.2 よりも小さい場合には基準面濃度が既往データよりも 1~2 オクターブ大きくなる。一方、 $w_0/u_* > 0.2$ では、既往データの下限値を外挿する式として捉えることが出来そうである。これは、本邦や海外の主要な既往データを収集して経験的に作られた Garsia-Parker 式の対象データの範囲にも理由があると思われる。 $w_0/u_* = 0.2$ から浮遊限界 ($w_0/u_* = 1.0$) 付近の国内外の実験データは多いが、わずかな w_0/u_* の違いで基準面濃度が大きく変わる水理条件であるため、基準面濃度は 1 オクターブ程度のスレは容易に発生する。従って、これらのデータを総じて使用して経験式を作成すると、Garsia-Parker 式のような経験式が作られる可能性が高い。なお、Garsia-Parker 式では、 w_0/u_* が約 0.1 よりも小さくなると、基準面濃度が 0.3 程度に収束する。

一方、式(1)の外挿式を見ると、浮遊限界では基準面濃度はゼロに漸近し、 $w_0/u_* > 0.2$ では基準面濃度は、芦田・道上式と類似した値をとる。さらに、 $w_0/u_* < 0.2$ では基準面濃度は、板倉・岸および芦田・道上式と類似した値をとる。しかしながら、浮遊砂流では流れが強い、もしくは、粒径がかなり小さい条件である、 $w_0/u_* < 0.1$ では、既往データがほぼ得られていないため、これより w_0/u_* が小さい範囲では、やはり、式(2)のような、基準面濃度の頭打ちに何らかの工夫の必要性を示している。

3)河床変動モデル: 混合砂による時間発展は、流砂の出入り、浮遊砂の乱流拡散や巻き上がり・沈降による河床位の時間変化や粒径の時間変化を解くことになる。今回、式(4)の巻き上がり E に対する取り扱いを行ったため、式系全体は閉じると共に、経験的な係数を持ち込むことが無くモデルが構成されることになる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{B} \sum_k \left\{ \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial B_b q_{bk}}{\partial x} + \frac{1}{1-\lambda_s} B_s (E_{sk} - D_{sk}) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (A c_k) + \frac{\partial}{\partial x} (A u c_k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \varepsilon_{sk} \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + B_s (E_{sk} - D_{sk}),$$

$$E_{sk} = w_k c_{ek}, \quad D_{sk} = w_k c_{ak} \quad (4)$$

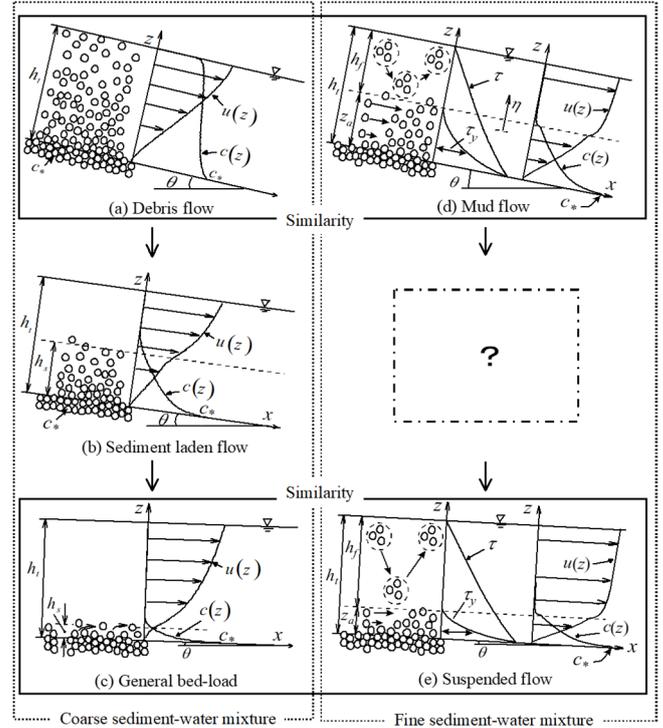


図-3 流れのモデル⁷⁾

$$c_{ak} = c_k \alpha / (1 - e^{-\alpha}), \quad (5)$$

$$\alpha = 15 w_k / u_* (1 - a/h), a/h = 0.05 \quad (6)$$

ここに、添字 k : 粒径階の番号, q_{bzk} : 流下方向 x の流階階 d_k の単位幅の掃流砂量, E_{sk} , D_{sk} : 粒径 d_k の浮遊砂の河床付近における単位面積当たりの浮上量と沈降量, z_b : 河床高, λ_b , λ_s : 掃流砂, 浮遊砂の空隙率, B : 河道幅, B_s : 流砂幅, c_k : 浮遊砂の粒径 d_k の断面平均濃度, u : 断面平均流速である。式(5)および式(6)は、浮遊砂のラウス分布を用いて得られるレーン・カリスキ型の水深平均された浮遊砂の平均濃度と底面付近濃度とのよく知られた関係である⁶⁾。

3. おわりに: 前報²⁾に続き、山地溪流における実用的な河床変動計算モデルの確立を目指した試行を行った。浮遊砂の時空間の追跡には、巻き上がり・沈降と拡散型モデルによる枠組みを用いるものとして、ここでは、前報で課題として残った基準面濃度に関する改良を行った。基準面濃度に対する扱いは、Garsia-Parker 式では沈降速度と摩擦速度比の幅広い範囲で基準面濃度の値は大きい変化をする。また、外挿式における基準面濃度は、移動床の河床面での静止体積濃度よりも小さい、凡そ、0.2 程度値が現象論的には良いようである。これについては、別途、物理的な解釈も加えた説明等を行っていく予定である。

参考文献: 1) 渡部ら: 令和2年度砂防学会研究発表会概要集, pp.207-208, 2020, 2) 伊藤ら: 令和6年度砂防学会研究発表会概要集, pp.21-22, 2024, 3) 濱原ら: 令和3年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 373-374, 2021, 4) 芦田ら: 京大防災研年報, 13号B, pp. 233-242, 1970, 5) 関根雅人: 移動床流れの水理学, 共立出版, 2005年2月14日, 6) 土木学会 編: 水理公式集 [平成11年度版], 147, 1999, 7) 伊藤隆郭: 立命館大学学位論文, 2001.